

Lublin, 2024-01-06

Dr hab. inż. Jarosław Bienias
Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Inżynierii Materiałowej

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Barbary Helizanowicz
nt. „Użycie preimpregnatów o niskiej gramaturze do wytwarzania metodą autoklawową
płyt z kompozytu polimer-włókno węglowe zawierających krzywizny o małym
promieniu”**

Recenzja wykonana została na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej Prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej z dnia 31 października 2023 roku.

I. Charakterystyka ogólna pracy

Recenzowana rozprawa, zrealizowana pod opieką promotora w osobie dr. hab. inż. Mateusza Koziola profesora Politechniki Śląskiej i promotora pomocniczego dr inż. Aleksandry Bogdan-Włodek, dotyczy aktualnego trendu w inżynierii materiałowej, a mianowicie prac naukowo-badawczych i wdrożeniowych związanych z kompozytami o osnowie polimerowej wzmocnionymi włóknami węglowymi.

Praca przedłożona jest w postaci manuskryptu liczącego 227 stron. Treść zawarta jest w dziesięciu rozdziałach, z których pierwszy stanowi wprowadzenie, drugi i trzeci część literaturową, a pozostałe prezentują motywację, cel i zakres pracy, badane materiały, metodykę i wyniki badań oraz zbiorczą analizę otrzymanych wyników i podsumowanie. Praca opatrzona jest streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem ważniejszych skrótów i symboli, spisem rysunków i tabel wraz z numerami stron oraz załącznikami zawierającymi wyniki szczegółowych badań (załączniki 1-5). Wykaz literatury obejmuje 213 pozycji, w większości angielskojęzycznych, publikowanych w specjalistycznych czasopismach i wydawnictwach naukowych w przeważającej części z ostatnich 10 lat. Układ pracy jest logiczny, prezentacja metodyki badań i wyników czytelna, poprawna graficznie i edycyjnie. Praca doktorska została wykonana w ramach studiów doktoranckich w programie

„doktorat wdrożeniowy”, którego partnerem przemysłowym było Śląskie Centrum Naukowo-Technologiczne Przemysłu Lotniczego Sp. z o.o. (ŚCNTPL).

II. Ocena merytoryczna

Kompozyty o osnowie polimerowej wzmocnione włóknami węglowymi stanowią aktualnie bardzo szeroko stosowaną grupę materiałów konstrukcyjnych. Wytwarzane są kompozyty o różnorodnych właściwościach, również projektowanych w celu określonego zastosowania. Przykładem mogą tu być kompozyty dla lotnictwa oraz techniki kosmicznej. Związane jest to z możliwością do osiągnięcia znaczną modyfikacją charakterystyk mechanicznych i fizycznych pod wpływem wprowadzenia włókien wzmocniających – włókien węglowych do osnowy, co czyni kompozyty niezwykle interesującymi zarówno pod względem poznawczym jak i aplikacyjnym. Postęp w technologii kompozytów otworzył nowe perspektywy dla nowych metod wytwarzania m.in. technik pozautoklawowych oraz zastosowania preimpregnatów o bardzo niskiej gramaturze. Wraz z wprowadzaniem tych zaawansowanych materiałów pojawił się jednak problem związany z określeniem i optymalizacją ich właściwości, a w szczególności technologią kształtowania elementów o złożonych kształtach. Od początku wprowadzenia preimpregnatów o niskiej gramaturze występują wątpliwości co do ich rzeczywistego wpływu na zwiększenie właściwości i efektywności kształtowania wytwarzanych elementów kompozytowych.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska skupia się na wykorzystaniu preimpregnatów polimerowych z włóknami węglowymi o niskiej gramaturze do wytwarzania metodą autoklawową elementów zawierających krzywizny o małym promieniu w aspekcie poprawy ich właściwości oraz charakterystyk technologicznych. Wpisuje się ona w nurt poszukiwań sposobów podwyższenia wybranych właściwości kompozytów poprzez zastosowanie różnorodnego typu modyfikacji materiałów w technice autoklawowej, która jest stosowana do wytwarzania zaawansowanych i odpowiedzialnych struktur kompozytowych. Preimpregnaty o niskiej gramaturze mogą mieć duży potencjał w wytwarzaniu cienkościennych elementów kompozytowych dla zastosowań lotniczych i techniki kosmicznej, optymalizacji ich struktury oraz właściwości.

W pierwszym rozdziale rozprawy doktorskiej stanowiącym wprowadzenie, Autorka przedstawiła ogólne informacje na temat kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknami węglowymi, w szczególności wskazując na właściwości, które decydują o ich zastosowaniach technicznych. Wskazano również na technologię wytwarzania elementów

kompozytowych tj. metodę autoklawową jako jedną z najbardziej zaawansowanych metod wytwarzania kompozytów oraz tworzenie preimpregnatów o niskiej gramaturze. Przedstawiane materiały i technologie są rozwijane oraz wykorzystywane poprzez ŚCNTPL i mogą stanowić obszar potencjalnych wdrożeń rezultatów rozprawy doktorskiej mgr inż. Barbary Helizanowicz. Autorka wskazała również problemy podczas formowania i utwardzania wyrobów zawierających krzywizny, które mogą wpływać na obniżenie ich jakości i właściwości, a także potrzebę systematycznych badań preimpregnatów o niskiej gramaturze. Rozdział zakończony jest skrótowym opisem zawartości poszczególnych części rozprawy doktorskiej.

Rozdział drugi, podzielony na odpowiednie podrozdziały stanowi ogólny przegląd metod wytwarzania materiałów kompozytowych z wykorzystaniem preimpregnatów. Autorka skupia się głównie na opisie metody autoklawowej do wytwarzania kompozytów oraz zastosowaniu procesów zautomatyzowanych do nawijania czy układania preimpregnowanych taśm jednokierunkowych. Zaprezentowano zalety, wady oraz ograniczenia powyższych metod wytwarzania. Problemy te przedstawiono w oparciu o przeprowadzony przegląd literatury, własne doświadczenia oraz doświadczenia partnera przemysłowego - ŚCNTPL. W kolejnym podrozdziale przedstawiono inne wybrane metody wytwarzania wyrobów kompozytowych bazujące na preimpregnatach - metodę pozaautoklawową oraz utwardzanie na prasach.

W kolejnym rozdziale przedstawiono, w wystarczającym stopniu charakterystykę preimpregnatów o niskiej gramaturze. Zaproponowano podział preimpregnatów na preimpregnaty klasyczne (standardowe) oraz preimpregnaty o niskiej gramaturze. Autorka opisała również budowę preimpregnatów cienkowarstwowych. Rozdział ten zawiera ponadto zwięzły opis metody wytwarzania preimpregnatów o niskiej gramaturze. Istotny jest podrozdział przedstawiający korzyści oraz problemy wynikające z zastosowania wyżej wspomnianych preimpregnatów. Zwrócono uwagę na czynniki wpływające w sposób korzystny i negatywny na właściwości mechaniczne – wytrzymałościowe zarówno preimpregnatów jak i wytworzonych z nich elementów kompozytowych. Poruszone zostały również kwestie obecności defektów oraz cech geometrycznych w procesie utwardzania preimpregnatów cienkowarstwowych. Autorka wskazuje obszary, które wymagają stosowania dalszych badań i rozstrzygnięć, a mianowicie: optymalizacja właściwości mechanicznych i wpływ grubości warstwy (również w aspekcie procesu technologicznego) oraz określenie struktury i właściwości laminatów wytworzonych z preimpregnatów o niskiej gramaturze w zakrzywionych obszarach wyrobów.

Dalsze rozważania w części literaturowej skupiają się na analizie wyrobów kompozytowych posiadających różnego rodzaju krzywizny (rozdział 4). W rozdziale tym zaprezentowano aspekty wytrzymałościowe kompozytów zawierających krzywizny. W kolejnym podrozdziale Autorka przedstawiła defekty w obszarach krzywizn zarówno samych preimpregnatów podczas kształtowania elementów oraz powstające podczas utwardzania wyrobów kompozytowych z wykorzystaniem technologii autoklawowej. Ostatni z podrozdziałów dotyczy wskazania właściwości preimpregnatów mogących mieć wpływ na procesy formowania krzywizn. Zaliczono do nich: ścinanie w płaszczyźnie, dwuosiowe rozciąganie w płaszczyźnie, ścianie międzywarstwowe, sztywność przy zginaniu oraz współczynnik zagęszczenia.

W mojej ocenie powyższe rozdziały są istotne w punktu widzenia zakresu pracy oraz wprowadzenia czytelnika w problematykę podjętej tematyki badawczej i w wystarczającym stopniu przedstawiają informacje dotyczące aktualnego stanu wiedzy w zakresie kształtowania struktur kompozytowych z wykorzystaniem preimpregnatów cienkowarstwowych.

Motywację do podjęcia badań stanowiących podstawę opracowania rozprawy doktorskiej przedstawiono w rozdziale 5, w którym wskazano na braki w charakterystykach laminatów cienkowarstwowych również w aspekcie formowania elementów kompozytowych. W związku z podniesionymi przez ŚCNTPL problemami w obszarze rozwijania produkcji i wytwarzania preimpregnatów o niskiej gramaturze do wytwarzania zawansowanych elementów kompozytowych zawierających krzywizny, niniejsza rozprawa doktorska w ramach programu „doktorat wdrożeniowy” i przedstawione w niej wyniki badań oraz rekomendacje mogą mieć istotne znaczenie. Należy zgodzić się z motywacją doktorantki do podjęcia badań w tym obszarze zważywszy na niewyjaśniony i w mojej ocenie kontrowersyjny wpływ preimpregnatów o niskiej gramaturze na poszczególne charakterystyki-właściwości wyrobów kompozytowych i technologię ich kształtowania.

Celem naukowym pracy była ocena właściwości mechanicznych belek kompozytowych zawierających krzywizny o różnej geometrii, wytworzonych metodą autoklawową na bazie preimpregnatów o niskiej gramaturze. Natomiast jako cel wdrożeniowy Autorka wskazała ocenę efektywności stosowania preimpregnatów o niskiej gramaturze w autoklawowym procesie wytwarzania kompozytowych struktur zawierających krzywizny. Realizacja powyższych celów była związana z weryfikacją wskazanej tezy pracy tj. zastosowanie preimpregnatu węglowo-epoksydowego o gramaturze 75 g/m^2 do wytwarzania struktur CFRP zawierających krzywizny, pozwoli na uzyskanie lepszej jakości

i wytrzymałości wyrobu w stosunku do węglowo-epoksydowego preimpregnatu o gramaturze 150 g/m².

Zakres badań ukierunkowany był na określenie wpływu gramatury badanych preimpregnatów na właściwości mechaniczne-wytrzymałościowe oraz aspekty technologiczne i obejmował:

- badania właściwości preimpregnatów o niskiej oraz standardowej gramaturze w stanie nieutwardzonym,
- badania mechaniczne – właściwości wytrzymałościowych wytworzonych kompozytów z badanych preimpregnatów o niskiej oraz standardowej gramaturze,
- ocenę procesu wytwarzania wyrobów zawierających krzywizny o różnej geometrii w technologii autoklawowej z preimpregnatów o niskiej oraz standardowej gramaturze,
- ocenę jakości wytworzonych zakrzywionych elementów – belek kompozytowych,
- porównanie wytrzymałości zakrzywionych elementów – belek kompozytowych wytworzonych z preimpregnatów o niskiej oraz standardowej gramaturze.

Przedmiot badań stanowiły jednokierunkowe preimpregnaty węglowo-epoksydowe różniące się gramaturą (75 g/m² vs. 150 g/m²), które posłużyły do wytwarzania struktur kompozytowych zawierających krzywizny o małym promieniu. Do wytworzenia struktur kompozytowych z doświadczalnych preimpregnatów zastosowano technikę autoklawową.

Recenzowana rozprawa doktorska w części badawczej podzielona została na adekwatne etapy, które są kluczowe w całej pracy i w największym stopniu stanowią o jej wartości naukowej i potencjalnie wdrożeniowej. Przeprowadzone badania są logiczne i istotne dla poszczególnych etapów pracy. Metodykę badań oraz opracowanie wyników należy uznać za prawidłowe i rzetelne. Plan badań przyjęty przez Autorkę jest adekwatny do założonych celów rozprawy doktorskiej.

W mojej opinii na uznanie zasługuje wysoki poziom dojrzałości naukowej w planowaniu poszczególnych etapów realizacji rozprawy doktorskiej: od etapu badań preimpregnatów w stanie nieutwardzonym, poprzez kolejny etap jaki stanowiły badania właściwości mechanicznych elementów kompozytowych wytworzonych z badanych preimpregnatów, aż do końcowego etapu - wytworzenia elementów kompozytowych z krzywiznami. Poszczególne etapy obejmowały także analizy jakościowe i ocenę technologiczności.

W pierwszym etapie badań Autorka oceniała właściwości doświadczalnych preimpregnatów w stanie nieutwardzonym, które są istotne z punktu widzenia charakterystyk wytrzymałościowych jak i technologii kształtowania elementów kompozytowych z

krzywiznami. Badania obejmowały wyznaczenie współczynnika zagęszczenia, sztywności przy zginaniu, ścinania w płaszczyźnie. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że preimpregnat o niskiej gramaturze (75 g/m^2) jest bardziej podatny na powstawanie defektów podczas formowania i utwardzania wyrobów zawierających krzywizny niż preimpregnat o gramaturze standardowej (150 g/m^2).

W następnym etapie Autorka dokonuje oceny podstawowych właściwości mechanicznych – wytrzymałościowych laminatów wykonanych z badanych preimpregnatów o niskiej i standardowej gramaturze. W tej części badań oceniono wytrzymałość laminatów na rozciąganie, właściwości przy zginaniu, wytrzymałość na ścianie międzywarstwowe (ILSS), wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie warstwy. Otrzymane rezultaty wskazują na porównywalne wartości większości wyznaczonych właściwości wytrzymałościowych dla kompozytów wytworzonych ze standardowych preimpregnatów i kompozytów z zastosowaniem preimpregnatów o niskiej gramaturze. Dla kompozytów wytworzonych z preimpregnatów o niskiej gramaturze stwierdzono jedynie wyższą o 34% wytrzymałość na ścianie międzywarstwowe (ILSS).

Kolejnym adekwatnym i istotnym etapem były badania laminatów z krzywiznami. Dla oceny różnych geometrii krzywizny analizowano 3 kąty rozwarcia ramion elementów kompozytowych (90° , 120° , 150°) o promieniach krzywizny wynoszących 4 mm, 12 mm i 36 mm dla każdego z kątów. Przedstawiono wpływ geometrii, a także aspekty technologiczne (korzystne i niekorzystne) warunkujące odpowiednie kształtowanie elementów kompozytowych z wykorzystaniem obu rodzaju preimpregnatów. Na podstawie przeprowadzonego procesu formowania elementów zawierających krzywizny wnioskowano, że kształtowanie pojedynczej warstwy z preimpregnatu o niskiej gramaturze jest łatwiejsze, ale bardziej czasochłonne i uniemożliwiające zastosowanie zautomatyzowanych systemów laminowania. Ponadto stwierdzono, że preimpregnat o niskiej gramaturze jest bardziej podatny na powstawanie defektów technologicznych.

Istotnymi badaniami na tym etapie jest ocena makroskopowa wytworzonych struktur kompozytowych wraz z dokładną oceną obszaru krzywizn. Kontroli poddano również wybrane cechy geometryczne wytworzonych elementów kompozytowych (m.in. grubość w obszarze promienia) oraz określono gęstość i udział objętościowy poszczególnych komponentów.

Jednym z najbardziej istotnych badań jest kontrola jakości wytworzonych struktur kompozytowych zawierających krzywizny z wykorzystaniem badań nieniszczących - metodą aktywnej termografii w podczerwieni oraz tomografii komputerowej pod kątem

występowania ewentualnych defektów. Przeprowadzone badania jakościowe potwierdziły skłonność preimpregnatu o niskiej gramaturze do powstawania defektów o podłożu technologicznym (o większej ilości i większych rozmiarach) w wytworzonych elementach kompozytowych z krzywiznami. Odnotowano głównie defekty powierzchniowe, zmarszczki w obszarach krzywizny oraz zwiększone odległości pomiędzy poszczególnymi warstwami.

Kolejny etap badań Autorki jest bardzo istotny w aspekcie realizacji celów i tezy rozprawy. Przeprowadzono badania wytrzymałości CBS (*Curved Beam Strength*) wytworzonych belek kompozytowych zawierających krzywizny, wyznaczono wytrzymałość na rozciąganie międzywarstwowe ILTS oraz analizowano mechanizmy zniszczenia. Otrzymane rezultaty wytrzymałości CBS przy zginaniu zakrzywionej belki wykazały w przeważającej liczbie przypadków (geometrii krzywizn) wyższe wartości CBS dla kompozytów wykonanych z preimpregnatu o niskiej gramaturze. Kompozyty te charakteryzowały się natomiast niższą wytrzymałością na rozciąganie międzywarstwowe ILTS.

W mojej ocenie bardzo dobrym rozwiązaniem jest zbiorcza analiza otrzymanych wyników poczynając od etapów wyznaczenia właściwości preimpregnatów nieutwardzonych aż do właściwości wytrzymałościowych wytworzonych kompozytów. Znaczną część tej analizy danych poświęcono właściwościom laminatów zawierających krzywizny, wytworzonych z doświadczalnych preimpregnatów o niskiej i standardowej gramaturze. Szczególną uwagę zwrócono na analizę procesu kształtowania i ocenę jakości wytworzonych kompozytów, badania strukturalne oraz właściwości wytrzymałościowe CBS. W sposób poprawny merytorycznie rozprawę doktorską zakończono podsumowaniem i wnioskami wynikającymi z realizacji badań, a także rekomendacjami i wytycznymi wdrożeniowymi.

Oceniając całość przeprowadzonych badań i otrzymanych rezultatów należy stwierdzić, że osiągnięty został cel pracy, a mianowicie zbadanie i ocena możliwości efektywnego zastosowania prepregu o niskiej gramaturze w procesie wytwarzania zakrzywionych kompozytowych struktur warstwowych, z wykorzystaniem metody autoklawowej, co wykazano poprzez przeprowadzenie badań porównawczych laminatów wytworzonych z dwóch typów preimpregnatów – o standardowej i niskiej gramaturze.

W mojej opinii autorka słusznie i prawidłowo formułuje wniosek, że na podstawie uzyskanych wyników badań nie można jednoznacznie stwierdzić, iż zastosowanie preimpregnatu węglowo-epoksydowego o niskiej gramaturze (75 g/m^2) pozwoli na poprawę jakości i wytrzymałości wyrobów zakrzywionych w stosunku do preimpregnatu o standardowej gramaturze (150 g/m^2). Stanowi to w mojej ocenie kolejne zaprzeczenie zbyt

pochoptym, często spotykanym w literaturze stwierdzeniem, że preimpregnaty o niskiej gramaturze stanowią panaceum na wszystkie problemy związane z właściwościami oraz kształtowaniem struktur kompozytowych.

III. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

Czytając pracę nasuwają się pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym, z których najważniejsze przedstawiono poniżej. Przedstawione uwagi nie mają jednak istotnego wpływu na wysoką jakość recenzowanej rozprawy doktorskiej. Mają one charakter dyskusji naukowej w przedstawionej tematyce i mogą być uwzględnione w przyszłych badaniach naukowych oraz pracach wdrożeniowych.

1. Mając na uwadze wdrożeniowy charakter rozprawy doktorskiej oraz wskazany cel wdrożeniowy pracy, nasuwa się pytanie co Autorka pracy rozumie przez „...**ocenę efektywności** stosowania preimpragnatów o niskiej gramaturze...”, a także „...**wartościowych wytycznych** dotyczących możliwości zastosowania preimpregnatów o niskiej gramaturze ..”
2. W mojej opinii w rozprawie doktorskiej, będącą pracą naukową w sekcji materiały i metodyka badań precyzyjnej powinna zostać przedstawiona charakterystyka badanych preimpregnatów. W szczególności wątpliwości dotyczą m.in. zapisów: „włókna węglowe o wysokiej wytrzymałości” – jakiej ?, „standardowy moduł” – jaki ?, „prepregi zostały wytworzone przez jednego z partnerów przemysłowych” – którego partnera ?
3. Czym kierowano się przy wyborze poszczególnych preimpregnatów w szczególności preimpregnatu o niskiej gramaturze? Aktualnie dostępne i wykorzystywane są preimpregnaty o niskiej gramaturze w zakresie 40g/m^2 .
4. Rozprawa doktorska zawiera szereg wyników właściwości fizyko-chemicznych i wytrzymałościowych, których celem jest porównanie dwóch preimpregnatów. W mojej opinii wskazane byłoby przeprowadzenie analiz statystycznych dotyczących istotności statystycznej różnic otrzymanych wyników w badanych grupach kompozytów.
5. W mojej ocenie nie jest uzasadniona prezentacja wyników z tak dużą dokładnością m.in. grubość próbek i warstw (tab. 3, 5, 10, 24, 25), sztywność przy zginaniu (tab. 7), strzałka ugięcia (tab. 15, 16), gęstość próbek (tab. 30, 31), wartość siły (tab. 37, 38, 40) z uwagi na fakt, że nie analizowano niepewności pomiarowych.

6. Czy autorka pracy rozważała użycie preimpregnatów o niskiej gramaturze dla wytwarzania kompozytów zawierających krzywizny na formach „wklęsłych” lub „wklęsło-wypukłych” oraz wykorzystanie preimpregnatów tkaninowych o niskiej gramaturze ?
7. W podrozdziale 8.2 dotyczącym badań wytrzymałościowych dla analizy otrzymanych wyników wskazane byłoby dodatkowe zamieszczenie przykładowych wykresów siła-przemieszczenie, pomimo ich przedstawienia w załączniku do rozprawy.
8. W rozprawie doktorskiej przeprowadzono szerokie i istotne badania jakościowe wytworzonych kompozytów m.in. przy zastosowaniu aktywnej termografii w podczerwieni oraz tomografii komputerowej. Jakkolwiek w mojej opinii metoda aktywnej termografii w podczerwieni jest dość kontrowersyjna dla szczegółowej oceny jakości materiałów kompozytowych, w szczególności struktury wewnętrznej. W podrozdziałach 8.3.6 i 8.3.7 na poszczególnych obrazach termograficznych i CT powinny zostać zaznaczone/opisane w tekście rozprawy poszczególne wady m.in. zmarszczki, zaburzenia ułożenia włókien, pustki, rozwarstwienia, czy obszary o zwiększonej zawartości żywicy.
Ponadto mając na uwadze przedstawione w rozdziale 8.3.7 obrazy CT (jakość obrazów CT, rozdzielczość) wątpliwości budzi wyznaczenie poszczególnych odległości pomiędzy warstwami. Istotne byłoby przykładowe przedstawienie na obrazie CT sposobu pomiaru poszczególnych odległości pomiędzy warstwami.
9. Dużą spójność i równomierne rozmieszczenie włókien, które są szczelnie otoczone osnową potwierdzono za pomocą badań SEM. W mojej opinii analizy SEM są stosowane do oceny warstwy wierzchniej materiałów w tym przypadku kompozytów, a nie do struktury wewnętrznej wytworzonego laminatu. Ponadto na strukturę warstwy wierzchniej kompozytów wpływa m.in. konfiguracja pakietu podciśnieniowego oraz powierzchnia formy.
10. Istotną w aspekcie przedstawionych powyższych uwag (punkt 8 i 9) byłaby analiza mikrostruktury poprzez wykonanie klasycznych zglądów materiałograficznych. Pozwoliłoby to na stosunkowo prostą i adekwatną ocenę jednorodności mikrostruktury, grubości poszczególnych warstw, pomiarów grubości kompozytów w określonych obszarach (m.in. obszar promienia) itp.
11. W rozprawie doktorskiej analizowano kąt rozwarcia ramion dla każdego z badanych układów geometrii po utwardzaniu w autoklawie. Czy badano geometrię formy (m.in.

kąąt rozwarcia) po jej wytworzeniu metodą obróbki skrawaniem lub po procesie utwardzania elementów kompozytowych?

12. W mojej ocenie rekomendacje i wytyczne wdrożeniowe powinny być kompleksowe (spojrzenie całościowe) w stosunku do przeprowadzonych badań w rozprawie doktorskiej. Można odnieść wrażenie, że rekomendacje i wytyczne wdrożeniowe dla przedstawionych przypadków oparte są na wybranych właściwościach. Ponadto, stwierdzono, że ze względu na łatwiejszy proces formowania, wykorzystanie preimpregnatu o niskiej gramaturze nie powinno też istotnie zwiększyć ryzyka defektów o podłożu technologicznym. Jakkolwiek, w pracy oraz wnioskach stwierdzono, że preimpregnat o niskiej gramaturze jest bardziej podatny na powstawanie defektów technologicznych. Należy zwrócić uwagę, że kompozyty zawierające krzywizny wykonano metodą laminowania ręcznego, gdzie niezwykle istotne są umiejętności i doświadczenie laminatera.

W rozprawie doktorskiej dostrzeżono pewne uwagi o charakterze edytorskim:

- w mojej ocenie cytowania pozycji literaturowych nie powinny znajdować się na końcu akapitów, w niektórych przypadkach bardzo długich. Powinny być one wprowadzone w tekście bezpośrednio z przekazywanymi-cytowanymi istotnymi informacjami.
- stosowane zapisy orientacji i ilości warstw np. $[45^\circ/-45^\circ]_6$ (tabela 9, str. 80). W mojej ocenie prawidłowy zapis to $[\pm 45]_6$. Inne zapisy str. 55, 64, 79, 91, itd.
- słabo czytelne wykresy procesu utwardzania, rys. 81, str. 102
- słownictwo angielskie zamieszczane w tekście rozprawy w mojej opinii powinno być zapisane kursywą.

Uwagi o stosowanym słownictwie:

- „*standardowy moduł*” str. 51
- „*maksymalna próżnia*”, str. 51
- wskazane jest stosowanie jednakowego nazewnictwa: „*preg*” czy „*preimpregnat*”, „*pregi o większej grubości*” czy „*pregi o większej gramaturze*”, „*lekkih prepregów*” czy „*pregów o niskiej gęstości*” (np. str. 26 i 27), *kompozyty zawierające krzywizny* czy *kompozytowe struktury zakrzywione* (np. str. 35, 39)
- ...*”prawidłowego modelu zniszczenia*” ? str. 95
- - „*śledzenia czasu życia*”, str. 17, może np. okres trwałości, okres przydatności

- „*model zniszczenia*”, w mojej opinii właściwym byłoby określenie „mechanizm zniszczenia” lub „charakter zniszczenia”

IV. Wniosek końcowy

Przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską oceniam bardzo pozytywnie, a wyniki przeprowadzonych badań uważam za oryginalne w obszarze naukowym i stanowiące duży potencjał aplikacyjny, co odpowiada charakterowi pracy wykonywanej w ramach programu „doktorat wdrożeniowy”. Praca odpowiada dyscyplinie naukowej inżynieria materiałowa. Postawiony cel naukowy został osiągnięty – ocena właściwości mechanicznych belek kompozytowych zawierających krzywizny o różnej geometrii, wytworzonych metodą autoklawową na bazie prepregów o niskiej gramaturze.

Doktorantka wykazała się wiedzą teoretyczną niezbędną do realizacji tematu, zwłaszcza w zakresie właściwości i technologii kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknami węglowymi, umiejętnością właściwego zaplanowania eksperymentów, doboru metod badawczych do ich realizacji oraz umiejętnością wnioskowania, co wskazuje na posiadanie przez nią predyspozycji do prowadzenia badań naukowych.

Rozprawa spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Barbary Helizanowicz do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Mając na uwadze wysoki poziom rozprawy doktorskiej mgr inż. Barbary Helizanowicz, innowacyjność wytworzonych do badań materiałów, kompleksowo zrealizowane badania oraz formę oryginalnego rozwiązania problemu naukowego i wdrożeniowego wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.



Podpisał: dr hab. inż. Jarosław Bieniaś